

EVALUACIÓN DE LA CONTAMINACIÓN RESIDUAL DE HIDROCARBUROS DE FRACCIÓN LIGERA EN SUELOS MEDIANTE PROSPECCIÓN GASOMÉTRICA

Marlén Gutiérrez-Barrientos¹, Mariana Navarro-Elizondo¹, Juan Carlos Montalvo-Arrieta¹,
Fernando Velasco Tapia¹ & Ignacio Navarro-de León^{1,*}

*Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ciencias de la Tierra, Ex Hacienda de Guadalupe, C.P. 67700, Linares,
México*

* ignacio.navarrodl@uanl.edu.mx

Resumen

En la última década en México, ha sido evidente el aumento en el número de sitios contaminados por derrames de hidrocarburos. Este trabajo se centra en un caso de estudio en específico localizado en el estado de Nuevo León, donde la fuga de un ducto de gasolina afectó al suelo y agua subterránea cercanos a una población poniendo en riesgo a la salud de los habitantes. La finalidad de este estudio es evaluar el grado de contaminación residual de compuestos orgánicos volátiles (COV's) por medio de la prospección gasométrica. Se instalaron estaciones gasométricas en el sitio afectado. Con los datos obtenidos se desarrollaron dos modelos de distribución de concentración del hidrocarburo con el método de interpolación de distancia inversa ponderada. Los modelos de distribución generados muestran que actualmente los niveles de contaminación son bajos. Los bajos valores de concentración indican que la atenuación natural ha sido eficaz en este sitio, con una reducción general de casi el 90 % del valor inicial. Los factores que han contribuido a esta reducción se atribuyen a la profundidad somera de la fase libre original, el contraste en las permeabilidades de la formación Méndez debido a su alto contenido de arcillas y el suelo sobreyacente, así como las condiciones climatológicas caracterizadas por altas temperaturas y altas tasas evapotranspirativas que han contribuido a disminuir la presencia del contaminante.

Palabras clave

Derrame de hidrocarburos, compuestos orgánicos volátiles (COV's), prospección gasométrica, caracterización ambiental, delineación de bulbos de contaminación, método de interpolación de distancia inversa ponderada

Abstract

Over the past decade in Mexico, the increasing pollution of sites due to hydrocarbon spills has been evident. This work focuses on a specific study case located in the State of Nuevo León, where a gasoline pipeline leakage affected the soil and groundwater near a population, putting the health of the inhabitants at risk. The purpose of this study is to assess the degree of residual pollution of volatile organic compounds (VOC's) using a gasometrical prospecting method. Gasometrical stations were installed at the affected site, gasoline vapor concentration readings were taken, as well as temperature and barometric pressure. With the obtained data two distribution of hydrocarbon concentrations models were developed using the inverse distance weighted interpolation method. The distribution models generated show that pollution levels are currently low. The low concentration values indicate that natural

Gutiérrez-Barrientos, M., Navarro-Elizondo, M., Montalvo-Arrieta, J.C., Fernando Velasco-Tapia, F. & Navarro-de León, I. (2023): Evaluación de la contaminación residual de hidrocarburos de fracción ligera en suelos mediante prospección gasométrica. – en: Montalvo Arrieta, J.C., Ramírez Fernández, J.A., Aguilar-Madera, C.G., Jenchen, U., Salinas Jasso, J.A., Velasco-Tapia, F. & Navarro-de León, I. (eds.): Número especial en conmemoración del 90° Aniversario de la Universidad Autónoma de Nuevo León y del 40° Aniversario de la Facultad de Ciencias de la Tierra. – Actas de la Facultad de Ciencias de la Tierra, UANL, Linares, **9 (2023)**: 63-71.

attenuation has been effective in this site, with a general reduction of almost 90% of the initial value. The factors that have contributed to reducing the presence of the contaminant are attributed to the shallow depth of the original free-phase, the contrast in the permeabilities of the Méndez formation due to its high content of clays and the overlying soil, as well as the climatological conditions characterized by high temperatures and high evapotranspiration rates.

Keywords

Hydrocarbon spill, volatile organic compounds (VOC's), gasometrical prospecting method, environmental characterization, contaminant plume delimitation, inverse distance weighted interpolation method

Introducción

Un sitio contaminado es un lugar, espacio, suelo, cuerpo de agua o cualquier combinación de estos que ha sido contaminado con materiales o residuos que, por sus cantidades y características, pueden representar un riesgo para la salud humana, a los organismos vivos y al aprovechamiento de los bienes o propiedades de las personas (DOF, 2003).

La contaminación del suelo por hidrocarburos afecta la flora, fauna y microorganismos del suelo, la fertilidad de los suelos, el crecimiento de las plantas, así como la existencia y sobrevivencia de los animales que se alimentan de éstas. Además, también puede haber una afectación en el ámbito social que incluye los sistemas de producción, la salud, la economía y las formas de vida de las poblaciones, debido a los efectos de estos compuestos, los cuales son tóxicos para los humanos y para los seres vivos en sus diversas formas (microflora, mesofauna y fauna) (Cavazos-Arroyo et al., 2014).

Los accidentes, que dan como resultado derrames de hidrocarburos, pueden originarse en instalaciones petroleras durante las actividades de explotación, transformación, comercialización o distribución de petróleo y sus derivados (PEMEX, 1999). Algunos ejemplos de fugas originadas por accidentes son las que ocurren cuando eventos naturales como sismos o deslizamientos de tierra, causan la rotura de vías destinadas a la conducción de los hidrocarburos. Aun cuando la frecuencia de estos sea baja, involucran grandes volúmenes de hidrocarburos derramados, una extensa área afectada, contaminación del suelo y aguas superficiales, alteración de los ecosistemas y una pérdida de la vegetación (Castro, 2007).

Una toma clandestina es una perforación no autorizada de cualquier diámetro sobre una tubería de transporte, ocasionada por un acto vandálico (DOF, 2009). Se dividen en dos tipos, las tomas herméticas y las descontroladas. Las fugas de hidrocarburo también pueden ser causadas por algunos efectos de la corrosión a la estructura metálica de ductos y/o tanques. Además, existen algunos factores internos o externos que provocan las fugas, tales como laminaciones, grietas, fisuras, golpes, vibraciones o defectos de fabricación (PEMEX, 1999).

Las fugas o derrames ocasionados por la perforación de los ductos en las tomas clandestinas son una de las principales fuentes potenciales de contaminación al suelo y agua subterránea. El agua de lluvia que se precipita sobre el terreno se infiltra y constituye el principal vehículo que transporta hidrocarburo bajo diferentes fases ambientales hacia los acuíferos (Figura 1). La presencia de estos compuestos en el agua de consumo humano implica un alto riesgo a la salud, de ahí que los problemas de contaminación en suelo requieran ser atendidos a fin de evitar la contaminación de agua subterránea.

La contaminación del agua subterránea y del subsuelo puede ser definida como la adición antropogénica de elementos, compuestos y/o patógenos que alteran su composición y cuyo uso representa un riesgo. Una de las mayores dificultades para evaluar la contaminación del agua subterránea y del subsuelo es que no es perceptible a simple vista. Las fuentes de contaminación no son fáciles de observar y a menudo sus efectos no son observados hasta que el daño ha ocurrido (NRC, 1984). El uso de procesos naturales como parte del plan de acción para remediar un sitio se denomina "atenuación natural". – Algunos procesos que ocurren durante la atenuación natural pueden transformar los contaminantes en formas menos dañinas o inmovilizarlos para reducir los riesgos (NRC, 2000). El objetivo de este trabajo es evaluar el grado de contaminación residual de compuestos orgánicos volátiles (COV's) derivados de un derrame de gasolina en el noreste de México mediante prospección gasométrica y métodos geoestadísticos. La prospección gasométrica nos puede ayudar a determinar la ubicación de la fuente, la presencia, composición y distribución de hidrocarburos en el subsuelo y se utiliza como una primera medida en los trabajos de caracterización ambiental para definir el grado de fase adsorbida en la matriz del suelo y la delineación preliminar de bulbos de contaminación de fase libre y/o disuelta sobre el nivel freático y en el agua subterránea, respectivamente.

Área de estudio

El sitio se localiza en el ejido Cabezones, perteneciente al municipio de Montemorelos, Nuevo León. En marzo de 2017 se reportado un fuerte olor a gasolina en un pozo de agua potable y de acuerdo con la inspección realizada por las autoridades competentes, se determinó que la afectación se encontraba en el

subsuelo y que el agua subterránea estaba contaminada como consecuencia de una toma clandestina descontrolada de gasolina. El punto de fuga fue localizado en el Km. 407+799.86 del poliducto de 12-10" Ø Madero - Cadereyta perteneciente al Sector Ductos Victoria de Pemex Logística. Fisiográficamente el área se ubica en la Llanura Linares-Montemorelos en la porción occidental de la Provincia Fisiográfica Planicie Costera del Golfo de México, próxima a la Subprovincia de Sierras Altas, perteneciente a la Provincia Sierra Madre Oriental (SMOr), (Raisz, 1964). La Llanura Linares-Montemorelos presenta una inclinación general del terreno hacia el noreste y los valles alternan con una serie de mesetas orientadas en dirección SW-NE, con elevaciones que varían de los 200 a 500 msnm. De acuerdo con la clasificación climática de Köppen, modificada por García (1973), el clima predominante en el área es semicálido subhúmedo con las variantes (A)C(W2) y

((A)C(W0)). El registro climatológico de la estación 19007 Cabezones de la Comisión Nacional del Agua indica que la temperatura media anual promedio es de 22.1 °C, con máximas promedio de 28.8 °C en agosto y mínimas promedio de 15.4 °C en enero. La precipitación media anual es de 861 mm, con máximos en septiembre (218 mm) y mínimos en diciembre (20 mm). La evaporación media anual es de 1,588.9 mm alcanzando su máximo valor en julio (225 mm) y el mínimo en diciembre (65 mm). Hidrológicamente, el área queda comprendida en la Región Hidrológica del Río San Fernando-Soto La Marina (RH25) y de manera específica en la subcuenca Potosí (RH25Dd). Los suelos son principalmente vertisoles arcillosos, oscuros y con espesores de varios metros; aunque existen también regosoles con facies petrocálcica desarrollada y en menor medida xerosoles.

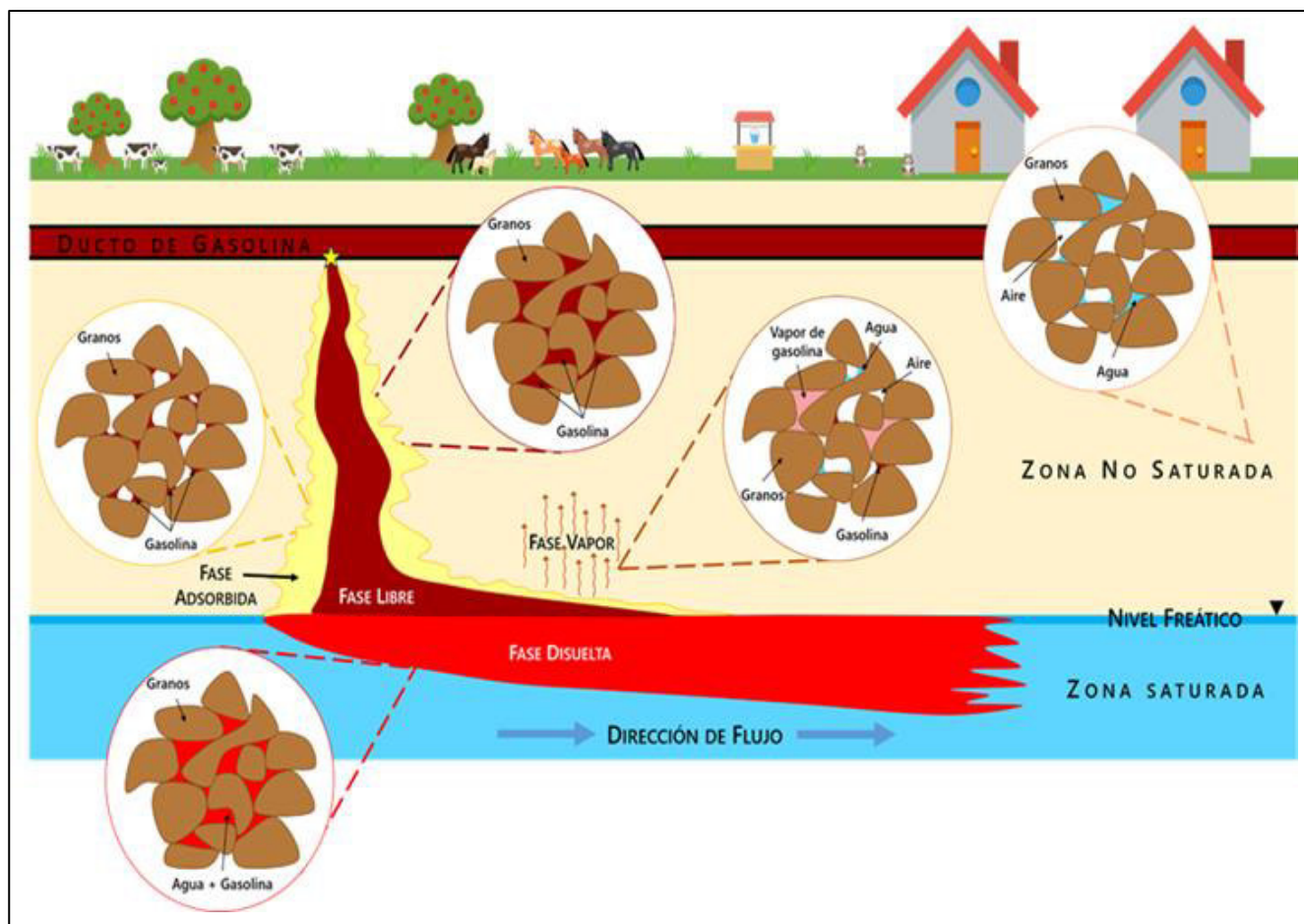


Figura 1: Fases ambientales durante la migración de hidrocarburos de fracción ligera (gasolinas) o media (diésel) en el subsuelo. Nótese que la dirección de transporte en la zona no saturada es vertical, mientras que en la zona saturada los compuestos migran lateralmente.

Geología Local

Aspectos litológicos

La geología se caracteriza por la presencia de suelos vertisoles de espesor variable, que va desde 10-15 cm hasta poco más de 4.5 m. Los procesos edáficos han permitido la diferenciación de este suelo en forma de horizontes: un horizonte superficial con alto contenido de materia orgánica que le imparte una coloración oscura y un horizonte más profundo rico en arcillas que poseen coloración amarillo-rojiza debida a la presencia de óxidos de hierro. El límite entre estos horizontes es irregular. Bajo la capa de suelo se encuentran rocas de

composición lutítica descritas como Formación Méndez. Se trata de una potente unidad arcillosa, compuesta por estratos laminares, delgados y medianos de lutitas de colores muy variados, entre gris oscuro, gris azuláceo, gris claro, café claro a marrón y café amarillento, presenta bioturbación y concreciones. En algunas zonas se encuentran intercalaciones de margas y arcillas de color verde olivo con bioturbación. Por lo general la Formación Méndez se encuentra muy intemperizada, en algunas ocasiones quedando como forma de agujas y en otras formando suelo como es el caso del sitio. En una de las excavaciones realizadas, con orientación W-E, a aproximadamente 200 m. del área de estudio, se observa el contacto entre la Fm. Méndez y el suelo (Figura 2).

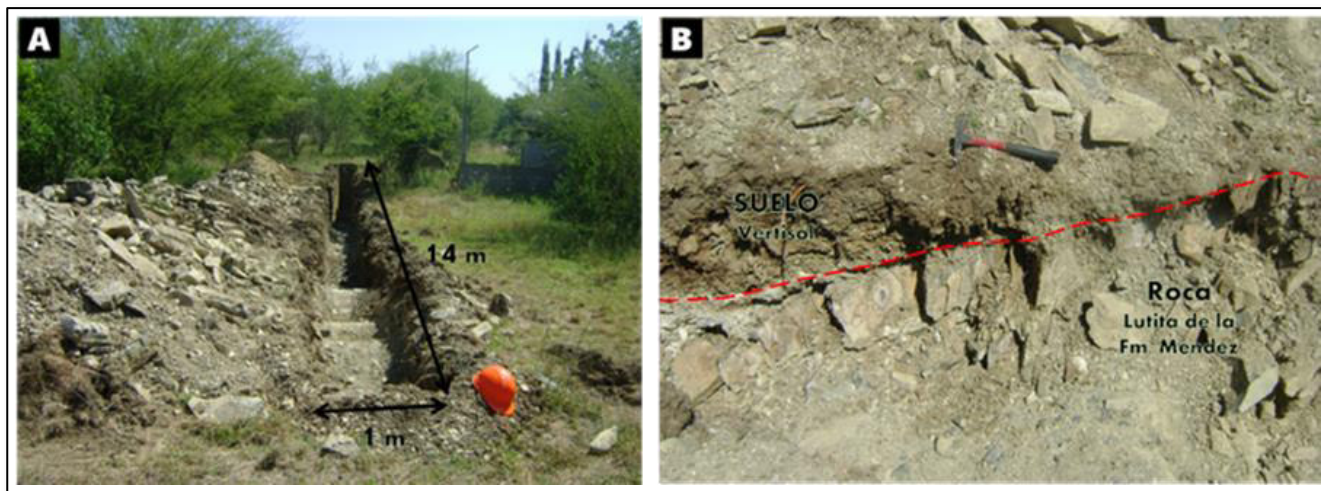


Figura 2: A) Cala y sus dimensiones: 14 metros de largo y un metro de ancho. B) Pared norte.

Aspectos estructurales

Los rasgos estructurales son consecuencia de diversas fases de la Orogenia Laramide y en este sitio, las rocas de la Fm. Méndez se observan los efectos compresivos. Estos se manifiestan por fracturas y fallas escalonadas de empuje. Posteriormente, el material cataclástico fue reemplazado por la precipitación de calcita formando vetas post-tectónicas que han servido como una guía para prospección de agua subterránea somera (Anderson & Aguilera, 1989). En la cala anteriormente mencionada se obtuvieron datos de estratificación para la lutita de la Fm. Méndez con un promedio de $336^{\circ}/66^{\circ}$. Además, se reconocen dos familias de diaclasas en la pared norte de la cala y una familia en la pared sur.

Metodología

Trabajo de campo

En un terreno de propiedad privada ubicado a 200 m al SSW del punto de fuga se instalaron 144 estaciones de medición gasométrica distribuidas a cada 7.5 m (Figura 3a). Los pozos para instalar las gasometrías fueron perforados utilizando un rotomartillo BOSCH modelo GBH11DESDES-max a 1 m de profundidad, se colocaron tubos de PVC de $\frac{1}{2}$ " (13 mm) de diámetro y 30 centímetros de largo con tapa (la tapa contaba con una orificio de $\frac{1}{8}$ " cubierto con cinta para facilitar la medición). Al estar sellados los tubos, los COV's presentes en el subsuelo se acumulan y así puede ser medida su concentración (Figura 3b).

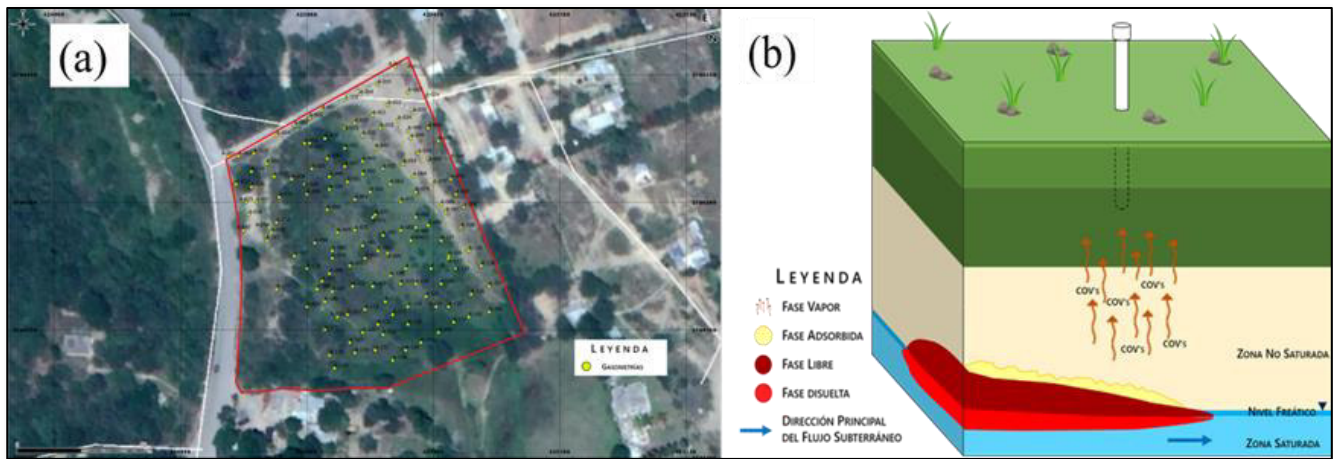


Figura 3: (a) Ubicación de las estaciones gasométricas. (b) Los COV's derivados de los hidrocarburos se volatilizan y ascienden por la zona no saturada, acumulándose parte de ellos dentro del tubo de colecta y medición de vapores.

Se tomaron dos lecturas; lectura 1 y lectura 2, dos y cuatro horas después de la instalación, respectivamente. En cada una de las lecturas se registró la hora, la presión barométrica, la temperatura y el valor de concentración de COV's en ppm. Para

obtener el valor de concentración de COV's se utilizó un detector de gases por fotoionización modelo ProCheck Tiger de la marca Ion Science Ltd. (Figura 4).

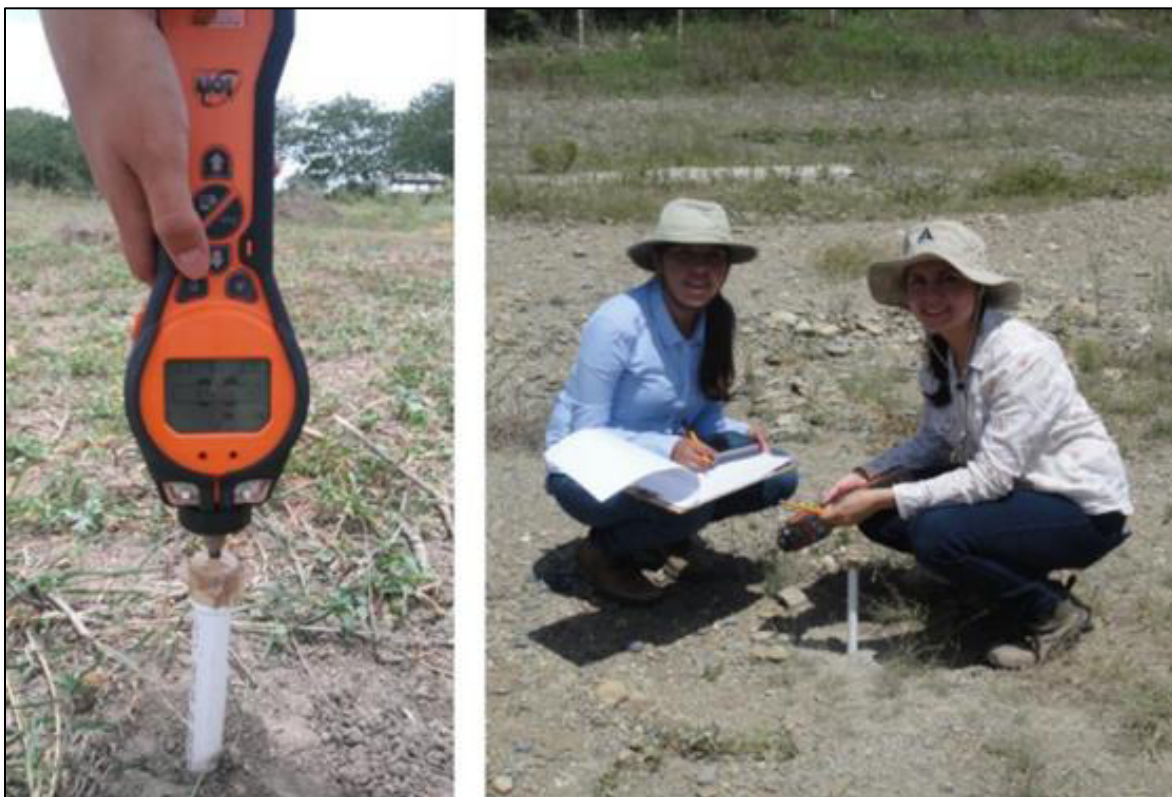


Figura 4: Determinación de COV's en una estación gasométrica con el ProCheck Tiger.

Resultados

Esta sección está integrada por el desarrollo de un modelo conceptual integral del sitio del derrame, la estadística de las determinaciones gasométricas, el análisis geoestadístico de la distribución de las emanaciones de vapor, así como del análisis de la reducción o atenuación natural del contaminante en el sitio.

Modelo conceptual

Para lograr una mejor comprensión del funcionamiento del sitio, se utilizaron los criterios descritos por Kresic & Mikszewski (2013) para el establecimiento del modelo conceptual integral. Este consiste en la representación simplificada del funcionamiento de un sistema real, en este caso el sistema agua subterránea y la interrelación de los mecanismos que operan bajo un conjunto de reglas naturales propias del sistema, incluyendo los efectos antropogénicos (derrames/contaminación). Desde el punto de vista geológico, en el sitio se presentan pequeños afloramientos de lutita y margas de la Fm. Méndez que representan aproximadamente el 10 % de un área de 10000 m². El resto está cubierto por una capa de suelo

cuyo espesor es irregular y va desde algunos centímetros hasta los 2 m. Hidrogeológicamente estas rocas representan un acuitardo de baja conductividad hidráulica (zona saturada) y el suelo (zona no saturada) es altamente permeable por el que se infiltró el contaminante de una manera relativamente rápida en las cercanías del punto de fuga. Una vez que el contaminante alcanzó la interfase de lutita-suelo, se movilizó lateralmente siguiendo la red de fracturas y la superficie irregular de la Fm. Méndez. Las acumulaciones de hidrocarburo en esta interfase litológica generan una fase libre discontinua sobre el nivel freático. En este punto, el hidrocarburo tiende a disolverse en pequeñas cantidades para dar lugar a una fase disuelta, por otra parte, su ubicación muy somera favorece la volatilización para ascender como fase vapor en el suelo (Figura 5). Las tendencias generales de la migración serían verticales descendentes en el punto de fuga y una vez que se alcanza el nivel freático o la Fm. Méndez, el contaminante migra lateralmente hacia el sur, por lo tanto, se infiere que el tipo de mecanismo de transporte es principalmente advectivo-dispersivo (Fetter, 1999) de acuerdo con la naturaleza de los materiales presentes (baja permeabilidad en la roca), las discontinuidades litológicas y estructurales.

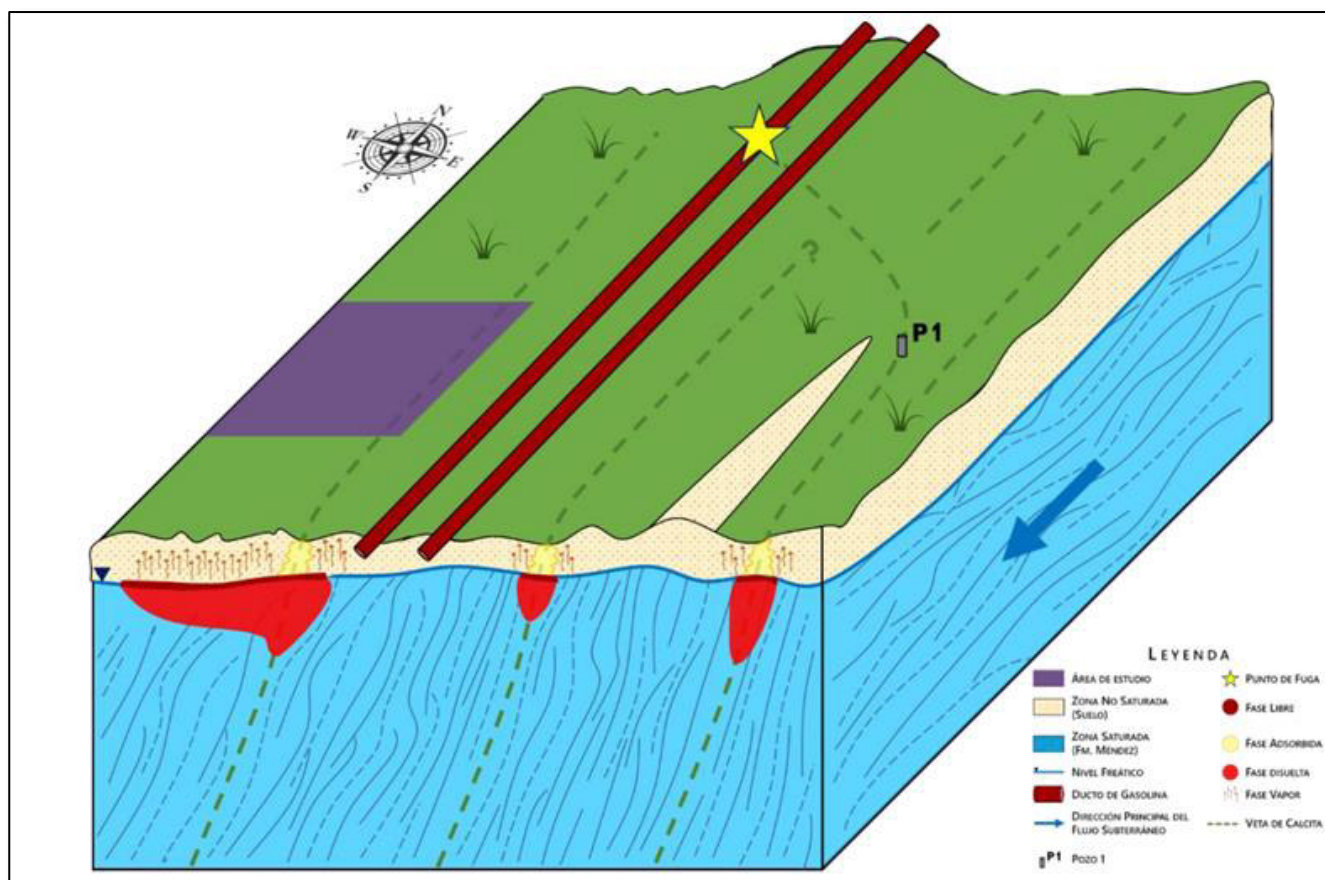


Figura 5: Modelo conceptual de la migración del contaminante en el área de estudio.

Estadística

Con el fin de analizar los valores determinados en campo de las concentraciones de COV's se procedió a realizar la estadística paramétrica de las lecturas obtenidas en campo. En el conjunto de datos de la Lectura 1, el valor mínimo registrado fue de 1.2 y el valor máximo fue de 88.5. Este conjunto de datos tiene una media aritmética simple de 18.68 y una desviación estándar de 17.85. En la Lectura 2, el valor mínimo obtenido fue de 1.4 y el valor máximo fue de 120.2. La media es de 30.90 y la desviación estándar es 25.03.

El histograma de las dos lecturas muestra una distribución con sesgo positivo (cola larga a la derecha) indica que en general los valores obtenidos fueron bajos (Figura 6). Esto se puede deber a varias razones, por ejemplo la hora en que se tomaron los datos, la ubicación de las gasometrías, la temperatura y presión atmosférica, así como la concentración media del contaminante en el subsuelo. Esta última se va reduciendo debido principalmente a la volatilización y a la degradación bacteriana.

Modelo geoestadístico de la distribución de COV's

Para generar estos modelos se realizaron dos lecturas de medición para las 144 estaciones gasométricas, los datos

obtenidos se interpolaron en el programa QGIS® versión 2.6.1 con el método distancia inversa ponderada (IDW, por sus siglas en inglés). En la Figura 7 se muestran los modelos resultantes, en los que las concentraciones de COV's más altas se encuentran en la parte norte del área de estudio, presentándose también algunos valores altos aislados. Con respecto a la Lectura 1, la Lectura 2 exhibe valores de concentración mayores. Esta diferencia se atribuye al tiempo que tuvieron los tubos instalados para acumular el vapor emanado.

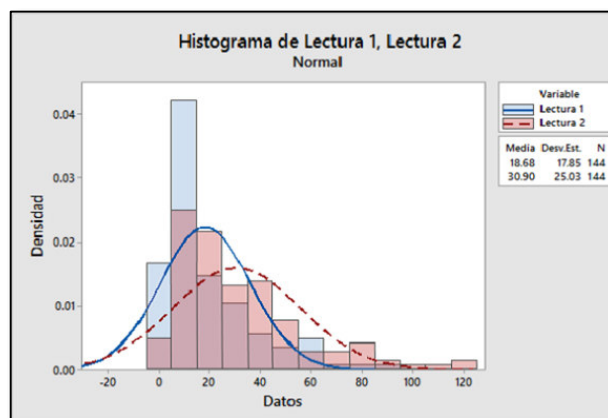


Figura 6: Histograma de frecuencias de las Lecturas 1 y 2 en conjunto. El sesgo es positivo para los dos.

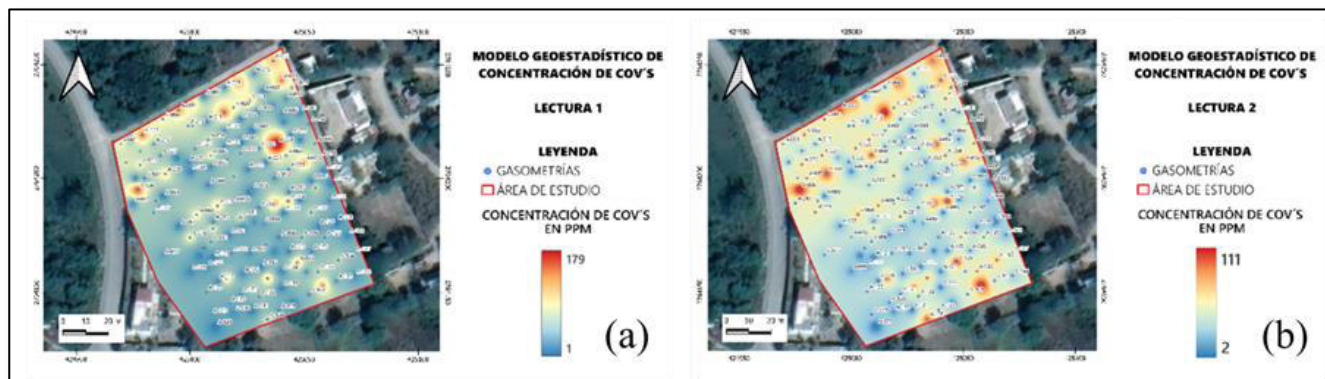


Figura 6: Histograma de frecuencias de las Lecturas 1 y 2 en conjunto. El sesgo es positivo para los dos.

Cabe mencionar que los valores obtenidos en este estudio son menores respecto los registrados inmediatamente después del derrame del hidrocarburo en marzo del 2017, fecha en la que se denunció la fuga. En la Figura 8(a) se observa como el modelo geoestadístico tiene una distribución del contaminante muy similar a la obtenida en este trabajo, con la diferencia de que los valores son hasta 100 veces más altos. Se atribuye la disminución de las concentraciones del contaminante derramado a un proceso

de atenuación natural (que incluye los procesos de biodegradación, volatilización y adsorción del compuesto en el suelo). En la Figura 8(b) se graficaron los promedios de las concentraciones obtenidas por la empresa que atendió la emergencia (Grupo Prif, S.A. de C.V.) y las obtenidas en este trabajo (Lecturas 1 y 2). En dicha gráfica se observa con mayor claridad la disminución de la concentración de hidrocarburo.

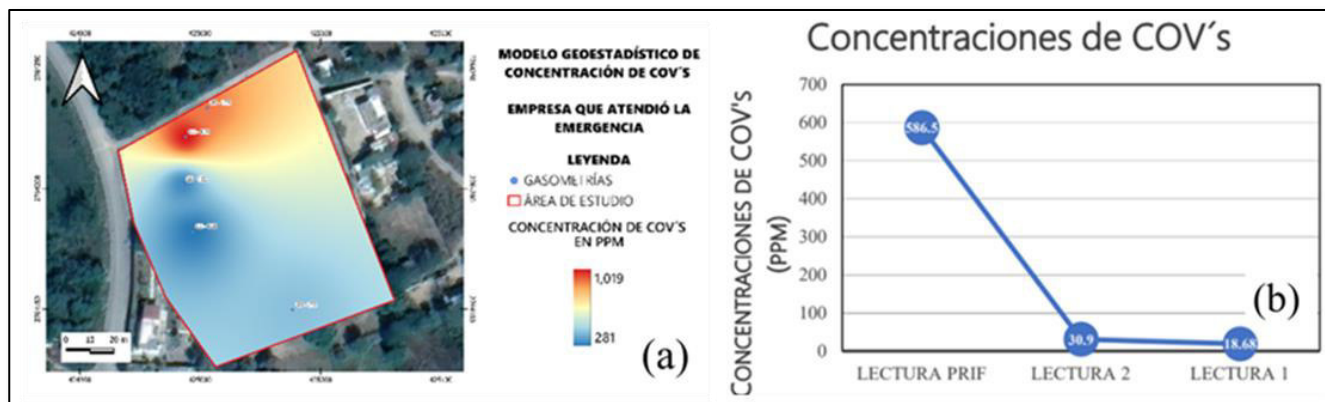


Figura 8: (a) Modelo geoestadístico obtenido en las dos primeras semanas de ocurrida la emergencia. (b) Reducción de las concentraciones de COV's debido a la atenuación natural, la Lectura PRIF corresponde a la primera quincena de abril de 2017 y las lecturas 1 y 2 se tomaron un año después.

Conclusiones

A partir de los resultados del presente trabajo se puede concluir que la aplicación del método de prospección gasométrica para la evaluación de la contaminación residual de hidrocarburos de fracción ligera constituye una herramienta de bajo costo para evaluar de manera rápida los procesos de atenuación natural, debidos principalmente a volatilización y a degradación aeróbica.

Las concentraciones registradas de COV's varían de entre 1.2 a 88.5 ppm para la Lectura 1 y entre 1.4 a 120.2 ppm para la Lectura 2. En comparación con los datos obtenidos, en fechas más cercanas a la fecha de la fuga del ducto, por la empresa (Grupo Prif) (280.8 a 1019 ppm) las concentraciones de gasolina han disminuido considerablemente. Las concentraciones obtenidas un año después representan aproximadamente el 10 % del valor promedio inicial.

Los modelos geoestadísticos de la distribución de COV's confirman la dirección de migración del bulbo contaminante. Las concentraciones más altas se ubican al norte del área de estudio y se reducen hacia el sur, coincidiendo con la dirección del flujo del agua subterránea.

A partir del modelo geológico generado en este trabajo basado en las propiedades litológicas y estructurales expuestas por la Fm. Méndez, la dirección del flujo subterráneo y el suelo en el área de estudio se determinó que las vetas de calcita paralelas a la estratificación propiciaron una rápida migración del hidrocarburo hacia la zona saturada.

En este caso particular, los procesos naturales que contribuyeron en mayor medida a la atenuación del hidrocarburo fueron la volatilización y la dilución. Debido a la alta presión de vapor de la gasolina ésta puede evaporarse fácilmente hacia la

superficie considerando que la capa de suelo es de reducido espesor.

En resumen, las concentraciones de COV's determinadas en el sitio de estudio se encuentran ya bajo los niveles establecidos por la normativa vigente de hidrocarburos en suelos, NOM-138-SEMARNAT/SSA1-2012 (200 ppm para uso de suelo residencial), es decir, a aproximadamente un 10 % del valor normativo.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su gratitud a la Gerencia de Protección Ambiental de Pemex Refinación, a la Gerencia del Sector Ductos Victoria de Pemex Logística, al Grupo PRIF, S.A. de C.V., a la Universidad Autónoma de Tamaulipas y a la Universidad Autónoma de Nuevo León por las facilidades otorgadas durante el desarrollo de los trabajos de campo.

Referencias

- Anderson II, B. & Aguilera, V. (1986): Push Faults, a Conceptual Model for Groundwater Exploration in the Sierra Madre Oriental Foreland, Mexico. – Zentralblatt für Geologie und Paläontologie. Teil I(9/10): 1149-1160.
- Castro, G. (2007): Informe final: Diseño monitoreo frente derrames de hidrocarburos. – Ministerio de Agricultura, Proyectos y Asesorías Ambientales. – 148 p.; Chile.
- Cavazos-Arroyo, J., Pérez-Armendáriz, B. & Mauricio-Gutiérrez A. (2014): Afectaciones y consecuencias de los derrames de hidrocarburo en suelos agrícolas de Acatzingo, Puebla, México. – Agricultura, Sociedad y Desarrollo, 11(4): 539-550.

- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2003): Ley General Para la Prevención y Gestión Integral de Residuos. – Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1ª edición. – 85 p.; México.
- DOF (Diario Oficial de la Federación) (2009): Respuesta a los comentarios respecto del Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-007-SECRE-2004, Transporte de gas natural, publicado el 25 de octubre de 2006. – Comisión Reguladora de Energía. – 37 p.; México.
- Fetter, C. W. (1999) “Contaminant hydrogeology. 2 nd. Edition – 500 p.; Upper Saddle River, NJ, USA, (Prentice-Hall Inc.).
- García E. (1981): Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). 3 a. Edición. – 252 p.; México, D.F. (Instituto de Geografía, UNAM).
- Krezic, N. & Mikszewski, A. (2013): Hydrogeological Conceptual Site Models: Data Analysis and Visualization, 1st. Edition. – 600 p.; Boca Raton, FL, US (CRC Press,).
- NRC (National Research Council) (1984): Groundwater contamination. 1st. Edition. – 179 p.; Washington, DC, EUA (National Academy Press.).
- NRC (National Research Council). (2000): Natural Attenuation for Groundwater Remediation. – 292 p.; Washington, DC, EUA (National Academy Press.).
- PEMEX (Petróleos Mexicanos) (1999): Diccionario de Términos de Pemex Refinación. 1ra Edición. – 216 p.; México (Petróleos Mexicanos).
- Raisz E. (1964): Landforms of Mexico. Map scale 1:4,000,000. 2nd. Edition. – 1 p.; Cambridge, United Kingdom (Naval Research).